

Méthode d'analyse en vue des études de pollution atmosphérique. Premiers résultats de l'étude des inversions thermiques au Sart Tilman (Liège-Belgique)

A. Laurant

Volume 13, numéro 29, 1969

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/020863ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/020863ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Département de géographie de l'Université Laval

ISSN

0007-9766 (imprimé)

1708-8968 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Laurant, A. (1969). Méthode d'analyse en vue des études de pollution atmosphérique. Premiers résultats de l'étude des inversions thermiques au Sart Tilman (Liège-Belgique). *Cahiers de géographie du Québec*, 13(29), 187–203. <https://doi.org/10.7202/020863ar>

Résumé de l'article

L'auteur présente une étude des inversions thermiques dans les basses couches de l'atmosphère. Ces inversions ont été mesurées sur un mât de 100 mètres pendant 20 mois environ. Elles ne dépassent pas, pour plus de la moitié d'entre elles, un gradient de 1 °C/100 m mais peuvent occasionnellement dépasser largement 10°C. Les inversions dont la base est au sol sont celles qui durent le plus longtemps ; de même, leur persistance croît avec leur puissance et ceci comporte un aspect pronostique intéressant. Le problème de la hauteur et de la base des inversions est également envisagé ; il débouche directement sur leur mode d'installation et de résorption. Ces deux derniers aspects diffèrent nettement, pour le site considéré, des schémas proposés classiquement.

MÉTHODE D'ANALYSE EN VUE DES ÉTUDES DE POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

Premiers résultats de l'étude des inversions thermiques au Sart Tilman (Liège - Belgique)

par

A. LAURANT

Assistant à l'université de Liège

Cet article fait suite à une première étude, publiée dans les Cahiers de géographie de Québec ¹, sur les vents et leur incidence sur la pollution atmosphérique. Ici également, l'auteur présente un mode original de dépouillement statistique des données de températures, qui peut s'appliquer utilement dans un autre site ².

La tour émettrice du Bol d'Air, située à proximité du domaine universitaire du Sart Tilman, à une dizaine de kilomètres au sud de la ville de Liège, a été équipée, depuis 1967, d'appareils de mesures météorologiques. Les observations doivent permettre d'évaluer la pollution de l'air qui résulte de l'installation d'une centrale de chauffe dans le domaine ; elles ne sont d'ailleurs qu'une partie de la vaste enquête interdisciplinaire qui a été lancée sur le sujet.

LE MATÉRIEL

Pour avoir tous les renseignements souhaitables sur les inversions thermiques, on installa des sondes thermométriques à 3, 25, 50, 75 et 100 m de hauteur sur la tour. Il s'agit de sondes à résistance Dégussa de 500 ohms à 0°C. Les valeurs, mesurées par pont de Wheatstone enregistreur, sont des températures différentielles rapportées à une sonde de référence située à 1,7 m du sol. L'échelle des températures va de - 10 à + 10 sur une largeur utile de 28 cm. La précision de lecture est de 1/20 de °C. Nous n'avons toutefois utilisé que le 1/10 de °C. L'introduction de résistances « vieilles » permet en outre de connaître, *avec la même précision*, la température réelle en °C. de la sonde de référence. L'étendue de mesure de ces températures réelles va de -30°C à +40°C. C'est là une échelle suffisamment large pour notre climat mais, grâce au système adopté, elle pourrait très aisément être élargie tout en conservant la même précision. L'enregistreur effectue une mesure de l'ensemble des sondes en trois minutes environ.

¹ N° 25, avril 1968, p. 123-139.

² Par exemple, la tour de télévision de Québec a été équipée d'un appareillage similaire à celui de Liège, par A. Hufty. Il sera fort intéressant de comparer les deux séries de résultats avec la même méthode.

PRINCIPES ADOPTÉS POUR LE DÉPOUILLEMENT

Tous les dépouillements de ce genre impliquent un certain nombre d'options. Il est évident, en effet, qu'il est matériellement impossible de prendre en considération la totalité des gradients verticaux de températures enregistrés. Nous avons donc choisi d'envisager uniquement les gradients mesurés toutes les heures. En dépouillant de trois minutes en trois minutes ou bien, comme cela se fait parfois, en moyennant les dix minutes qui précèdent chaque heure, nous n'aurions, selon toute vraisemblance, obtenu absolument aucun résultat significativement différent ni aucune précision supplémentaire.

La période d'enregistrement prise en considération va du 8 août 1967 au 12 mars 1969, soit près de 14 000 heures. Nous n'avons évidemment étudié dans ce travail que les cas où l'on n'observait pas un gradient adiabatique.

En suivant l'ordre des priorités, cela représente : tout d'abord les cas où la différence de température entre un ou plusieurs niveaux quelconques et le sol est positive ou nulle. On parlera alors d'inversions à 1, 2, 3 ou 4 niveaux. Ensuite, ce sont les cas où le gradient est compris entre $-0,8^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ et $0^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Etant donné que les sondes sont étagées de 25 en 25 m jusqu'à 100 m, cela signifie qu'un gradient ne sera pas adiabatique dès le moment où la différence de température entre un niveau quelconque et le niveau inférieur est plus petite que $0,2^{\circ}\text{C}$ (soit $-0,2^{\circ}\text{C}/25\text{ m}$). Enfin, la dernière catégorie prise en considération est constituée par les cas très nombreux où la différence de température d'un niveau quelconque par rapport au niveau inférieur est moindre que $-0,2^{\circ}\text{C}$. Nous avons notamment observé une haute fréquence de cas d'isothermie des niveaux 75 et 100 m bien que la température à 100 m puisse être de 1°C ou $1,5^{\circ}\text{C}$, voire 2°C , plus basse qu'au sol ; les niveaux inférieurs sont donc alors nettement suradiabatiques.

Ainsi, nous avons choisi $-0,8^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ comme valeur limite du gradient adiabatique. Nous ne l'avons pas fait de façon arbitraire mais pour les deux raisons suivantes : d'une part, $0,8^{\circ}\text{C}$ est une valeur intermédiaire acceptable entre les valeurs théoriques du gradient adiabatique sec et du gradient adiabatique humide ; d'autre part, un gradient de $-0,8^{\circ}\text{C}$ par 100 m correspond à $-0,2^{\circ}\text{C}$ par 25 m, ce qui est une valeur très commode pour la lecture des écarts de température entre deux niveaux voisins.

RÉSULTATS GLOBAUX

Les deux questions que l'on pose le plus fréquemment au sujet des inversions sont les suivantes : « quel pourcentage du temps les périodes d'inversions représentent-elles ? », et « quel est, en $^{\circ}\text{C}$ par 100 m, l'ordre de grandeur des valeurs d'inversions ? ». Donnons d'emblée à ces deux questions les réponses, d'ailleurs peu simples, qu'elles appellent. Nous veillerons ensuite à analyser plus en détail des aspects non moins importants.

Tableau 1 *Pourcentage des différents types de gradients*

— inversions proprement dites (un ou plusieurs niveaux à t° plus élevée qu'au sol)	21,8%
— température de chaque niveau < température au sol mais avec certains niveaux plus chauds que d'autres	4,8%
— isothermie à 75 et 100 mètres avec un écart de température entre 100 m et le sol compris entre 0 et $-0,8^{\circ}\text{C}$	10,0%
— isothermie à 75 et 100 m avec température à 100 m < $-0,8^{\circ}\text{C}$	35,1%
— gradient adiabatique	28,3%

Ainsi, les inversions proprement dites se sont présentées pendant plus du 1/5 de la période envisagée. Nous nuancerons toutefois ces chiffres en précisant notamment la valeur des inversions et en faisant intervenir une notion importante : la persistance. Les 21,8% d'inversions proprement dites se répartissent de la façon suivante : dans 17,7% des cas, 17,2%, 22,1% et 43%, il y a respectivement 1, 2, 3 ou 4 niveaux³ dont la température est supérieure ou égale à celle observée à 1,7 m.

Voulant caractériser brièvement les valeurs des inversions, nous avons tenu compte uniquement des écarts de température sol — 100 m. Pour fixer les idées, notons (figure 1) que, dans 56% des cas, la température à 100 m n'est que de 1° plus élevée qu'au sol. Mais il y a quand même 12% des cas où elle est supérieure à 3°. Si, de 0 à 4°C, nous assimilons la courbe représentative à une droite, celle-ci, pour 1000 heures d'inversion, a pour équation :

$$\log f = 0,305 d + 3 \quad (1)$$

(où f désigne la fréquence et d la température en degrés C)

Suivant cette équation, la fréquence est divisée par 2,02 tous les degrés. Si à présent, dans l'intervalle de -4 à -10°C, nous assimilons encore la courbe représentative à une droite, elle aura pour équation :

$$\log f = 0,145 d + 2,299 \quad (2)$$

Pour une différence de 1°C, la fréquence est à présent divisée par 1,4 ; plus simplement, elle est divisée par 2 tous les 2°C. Par ailleurs, si l'on s'en tient toujours à l'équation (2), on constate qu'il y a un cas sur 1000 heures d'inversion où la température à 100 m peut être de 15,9°C plus élevée qu'au sol, ce qui est une valeur tout à fait vraisemblable. Nous n'avons évidemment pu mesurer cette température puisque les appareils ne travaillent que sur une gamme différentielle de $\pm 10^\circ\text{C}$. Cependant, durant la période du 17 au 24 novembre 1967, une situation excep-

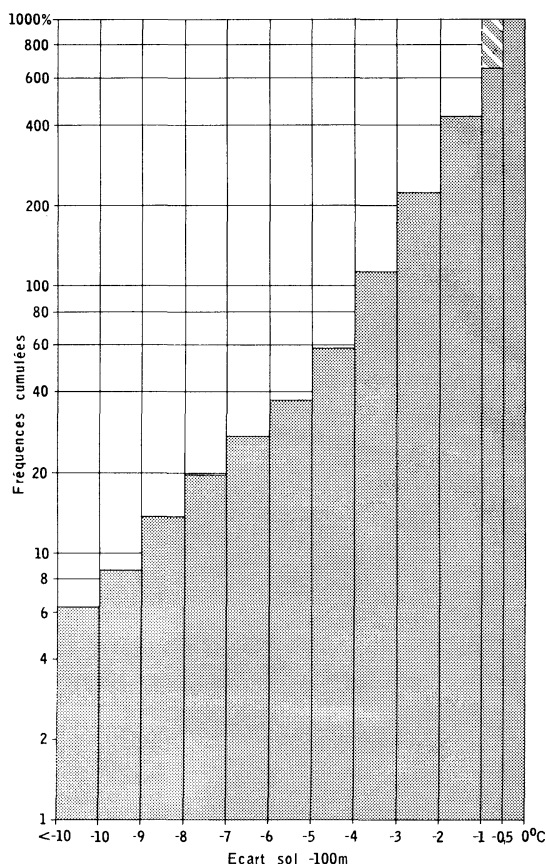


Figure 1 Fréquence cumulée des valeurs d'inversion repérées à 100 m (en % — semi-logarithmique)

³ Situés, rappelons-le, à 25, 50, 75 et 100 m.

tionnelle s'est présentée au cours de laquelle la température, pendant quelques heures, a atteint plus de 8° d'écart entre 25 m et le sol, les valeurs des sondes aux niveaux 50, 75 et 100 m ayant été inscrites en dehors du papier ! Compte tenu de ceci et sans connaître, au cours de cette période, les écarts 100 m — sol, nous pouvons ainsi considérer comme vraisemblable la valeur de 16°C proposée plus haut dans un cas sur 1000.

Nous nous demandons d'autre part si la chute du coefficient angulaire de l'équation (2) par rapport à l'équation (1) n'est pas due, pour une bonne part, à cette situation exceptionnelle de novembre 1967, laquelle aurait accru de façon anormale la fréquence des inversions supérieures à 5°C à 100 m. Une période de mesures plus longue pourrait seule nous dire quelle est la fréquence d'occurrence d'une telle situation. Nous nous gardons bien sûr d'accorder aux chiffres une valeur absolue. Ils permettent seulement d'apprécier un ordre de grandeur.

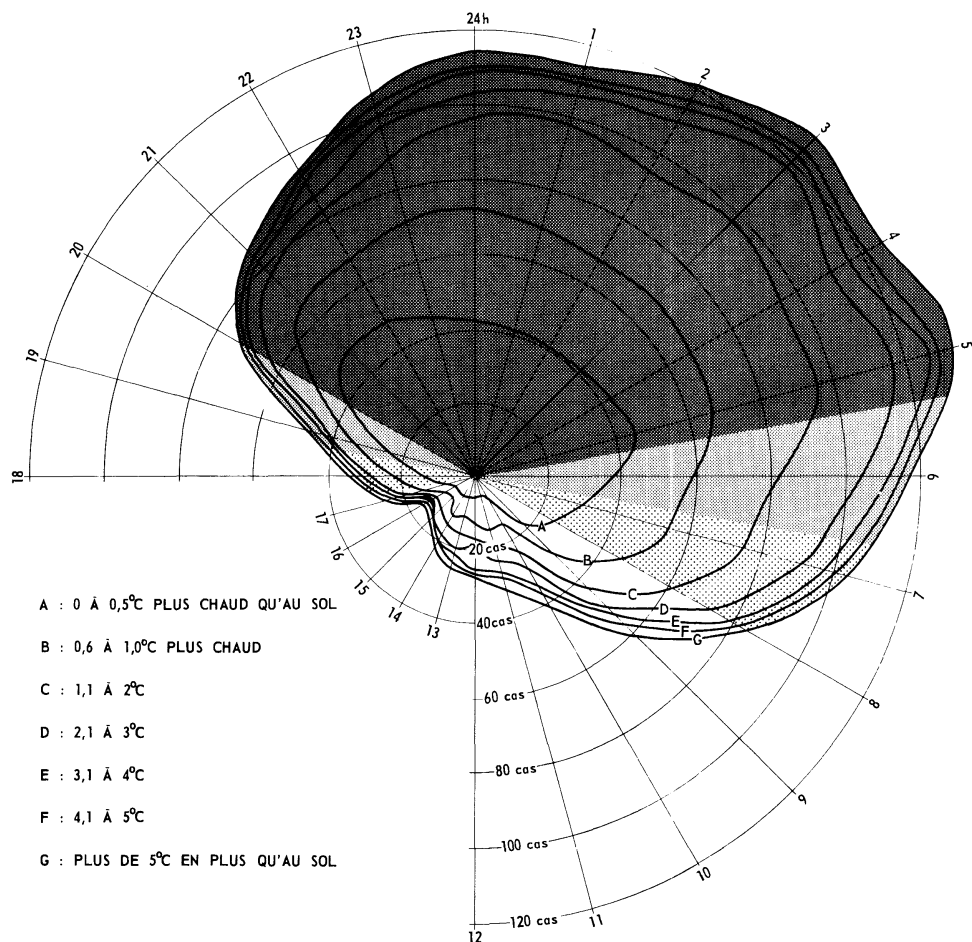


Figure 2 Distribution circadienne des inversions en fonction de leur valeur observée à 100 m (diagramme polaire)

ANALYSE

1. *Distribution circadienne des inversions*

Pour faire ressortir le plus simplement possible les caractères de la distribution circadienne des inversions, nous n'avons tenu compte que des valeurs d'inversion observées à 100 m ; c'est-à-dire des différences de température entre 100 m et le sol. Sur la figure 2, chacune des courbes A, B, C, . . . , est une distribution fréquentielle, suivant les heures de la journée, des différentes classes d'écarts de température 100 m-sol. Les fréquences de chaque classe sont ajoutées aux fréquences de la courbe précédente. Nous avons également figuré par des grisés différents les longueurs des nuits d'équinoxes et de solstices.

Cette figure montre tout d'abord une chose déjà connue : la fréquence nettement plus élevée des inversions nocturnes par rapport aux inversions diurnes. Il semble par ailleurs que la fréquence minimale soit atteinte à des heures plus matinales (11 heures) pour les faibles inversions que pour les inversions les plus fortes (vers 16 heures). Ceci semble normal puisque la résorption des fortes inversions nécessite un réchauffement plus considérable de l'air. Par ailleurs, il faut penser qu'en général les résorptions se font rapidement, sinon les fréquences des inversions faibles (classe A par exemple) seraient mieux représentées pendant les heures diurnes ce qui, alors, correspondrait au passage progressif des classes de fortes inversions vers les classes d'inversions faibles.

Un graphique de la distribution circadienne des inversions en fonction de la persistance de ces dernières ne donne aucun résultat intéressant. L'allure du graphique est très semblable à celle du graphique donné plus haut à la figure 2.

2. *Persistance*

La persistance des inversions est un aspect important dans l'étude de la pollution : des inversions fortes mais brèves, par exemple, auront des effets moins nocifs que si elles sont faibles mais très longues.

Examinons tout d'abord les enseignements qu'apporte la figure 3. Celle-ci, par des courbes cumulatives semi-logarithmiques, représente les pourcentages des persistances d'inversions. Par exemple, on voit sur la courbe supérieure que 50% des inversions considérées durent 13 heures et plus.

Nous avons déjà noté que les différences positives d'un niveau quelconque par rapport au sol pouvaient se localiser sur l'ensemble des quatre niveaux (25, 50, 75 et 100 m) ou à trois, deux ou un seul d'entre eux. Si, en plus, nous tenons compte des périodes où la chute de température est moindre que $0,2^{\circ}\text{C}$ par 25 m d'élévation et où, en même temps, elle est moindre que $0,8^{\circ}\text{C}$ à 100 m, nous aurons l'ensemble des cas envisagés sur les courbes de la figure 3. La courbe supérieure représente en fait tous les gradients non adiabatiques.

Nous constatons que les persistances s'accroissent très nettement au fur et à mesure que nous considérons globalement des inversions moins

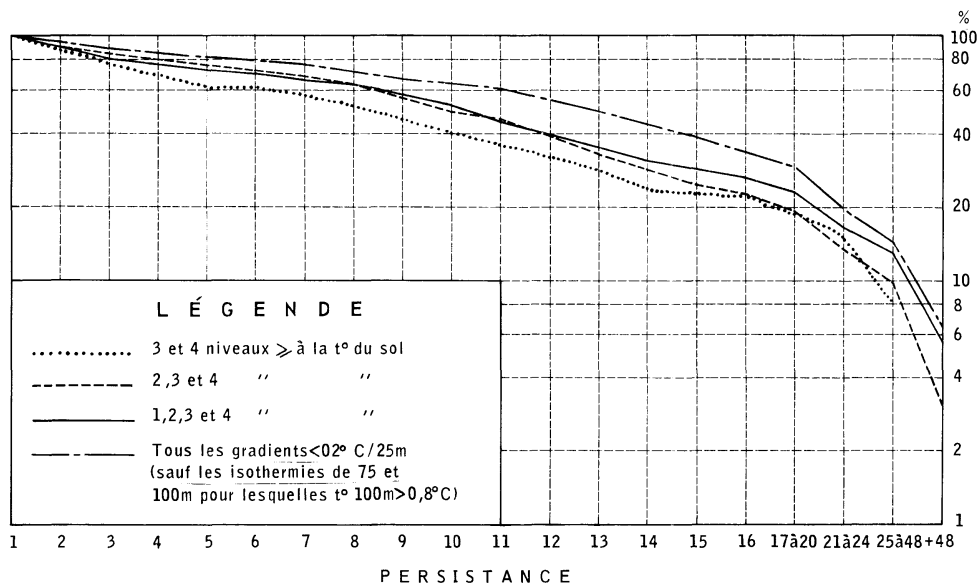


Figure 3 *Persistence générale (courbe cumulative de pourcentage)*

marquées s'ajoutant aux inversions les plus fortes. Par exemple, il y a 24% des inversions localisées à 3 ou 4 niveaux, qui durent plus de 14 heures ; mais si l'on y ajoute successivement les inversions localisées à deux niveaux quelconques, puis à un seul et si, enfin, nous considérons tous les gradients non adiabatiques, nous voyons, sur les courbes successives, que la persistance de 14 heures et plus représente respectivement 28, 31 et 44% des cas. Parallèlement, 50% des cas d'inversions durent, suivant les quatre catégories considérées, respectivement 8h.20, 9h.50, 10h.20 et 13 heures. Cela signifie que le supplément d'heures d'une catégorie par rapport à la précédente se répartit de façon telle que les persistances s'accroissent, donc que les heures d'inversions moins fortes s'ajoutent à chacun des groupes d'heures d'inversion plus marquée pour donner des persistances plus longues.

Compte tenu de ce que nous avons vu dans l'examen de la distribution circadienne des inversions, il semble qu'on puisse affirmer que ce glissement des inversions à quatre niveaux, vers des inversions qui concernent un nombre moins élevé de niveaux, puisse nous renseigner sur le mode d'installation et de résorption des inversions. Nous y reviendrons.

Il convient ici de répondre à une objection facile : les persistances propres aux inversions qui ne concernent que deux des niveaux ou un seul ne sont-elles pas nettement plus longues que les persistances relatives aux inversions de trois et quatre niveaux groupés, ce qui suffirait à accroître les pourcentages de longues persistances ? Il n'en est rien, au contraire. Le tableau ci-dessous suffira à le montrer. Il exprime, suivant le nombre de niveaux en inversion, le nombre minimum d'heures de persistance atteint dans 50, 20 et 10% des cas. (Par exemple, pour des écarts positifs aux quatre niveaux, il y a 50% des inversions qui durent 6 heures et plus, ou bien 20% des inversions qui durent 14 heures et plus.

Tableau 2 *Persistance des inversions suivant le nombre de niveaux*

Niveaux	50%	20%	10%
4 niveaux	6h.	14h.	19h.
3 niv. qcq	2h.10'	3h.40'	5h.
2 niv. qcq	1h.50'	3h.	3h.30'
1 niv. qcq	2h.	3h.30'	4h.50'
équil. thermique neutre	1h.50'	3h.	4h.25'

Nous constatons que nous sommes loin des valeurs de persistance représentées sur la figure 3. Grâce aux persistances relativement faibles que nous lisons dans ce tableau, nous pouvons conclure que les catégories d'inversions, distinguées d'après le nombre de niveaux concernés, se relaient l'une l'autre, lentement. En clair, cela signifie qu'une persistance de 20 heures sera, par exemple, la somme de 4 persistances de 5 heures d'inversions, celles-ci étant localisées successivement à 2, 3, 4 et 3 niveaux.

Observons aussi sur ce tableau le net hiatus entre les persistances des inversions localisées aux quatre niveaux, d'une part, et les autres persistances, d'autre part. Cela signifie que lorsque les écarts par rapport au sol sont positifs à tous les niveaux l'inversion durera plus longtemps que dans les autres cas.

Il nous faut à présent revenir à la figure 3 et examiner plus attentivement la courbe supérieure qui figure l'ensemble des conditions non adiabatiques. Celle-ci, en effet, se rapporte à l'ensemble des conditions favorables en général à la pollution. Si, de 1 à 11 heures de persistance, nous assimilons cette courbe supérieure à une droite, celle-ci aura pour équation :

$$\log f = - 0,02147 p + 3,02147 \quad (3)$$

où f désigne la fréquence et p la persistance.

D'après cette équation, la fréquence est divisée par 1,05 chaque fois que la persistance augmente d'une heure ou, si l'on veut, la fréquence est divisée par 1,5 chaque fois que l'on envisage une persistance de 8,2 heures plus longue. (Par exemple, il y aura 1,5 fois moins d'heures d'inversion ayant une persistance de 9h12' qu'il n'y a d'inversions persistant une heure).

Il nous paraît également légitime d'assimiler à une droite la portion de courbe située entre 11 et 16 heures de persistance. L'équation devient :

$$\log f = - 0,05336 p + 3,37233 \quad (4)$$

A présent, la fréquence est divisée par 1,13 lorsque la persistance croît d'une heure. En d'autres chiffres, la fréquence est deux fois moindre quand la persistance croît de 5,64 heures, soit environ toutes les 5h.40'. Toujours en conservant l'équation (4), on peut voir que dans 1% des cas, on aura une persistance de 63 heures⁴ et plus. Ceci n'est pas étonnant. Nous enregistrons

⁴ Elle aurait été de 140 heures pour l'équation (3).

en effet une persistance de 65 heures au cours de la situation exceptionnelle qui s'est présentée du 17 au 24 novembre 1967. Notons, par ailleurs, que le caractère exceptionnel de cette période n'a pas échappé à l'attention des observateurs de Tihange (site de vallée à une trentaine de kilomètres au SO de Liège).

Sans doute faut-il voir, dans les valeurs des coefficients de p des équations (3) et (4), l'influence des inversions nocturnes. Il semble légitime de penser que le rapport de 10/4 de ces deux coefficients de part et d'autre de 11 heures de persistance est le signe que, une fois franchi le cap des conditions les plus favorables aux inversions, c'est-à-dire les conditions nocturnes, les inversions se résorbent ou perdurent suivant que peut être apportée ou non l'énergie nécessaire au rétablissement d'un gradient adiabatique.

Soulignons à nouveau que de toute façon nous nous gardons d'attribuer aux chiffres le prestige des choses incontestables. Nous ne les proposons que dans le but de donner des ordres de grandeur.

3. *Persistances et courtes rémissions*

Ainsi donc, au cours de la période envisagée, la persistance n'a pas dépassé 65 heures. Ce chiffre peut paraître faible. Mais il convient de rappeler à ce sujet qu'il s'agit d'inversions ne présentant aucune discontinuité, mesurées sur une hauteur de 100 m seulement et dans un site de bordure de plateau qui domine de 200 m la large vallée mosane. En fait, certaines journées comportent plusieurs séries d'heures d'inversions séparées par de courtes rémissions d'une heure ou deux. Même la célèbre inversion du 17 au 24 novembre 1967 a été entrecoupée par des rémissions de deux ou trois heures à équilibre thermique instable. Il s'agissait cependant d'inversions extrêmement fortes (peut-être 16°C à 100 m) ! Or, nous allons le voir, les inversions les plus fortes sont aussi celles qui durent le plus longtemps.

Il est aussi difficile de différencier les mois ou les saisons au point de vue des gradients thermiques, la période d'observation étant trop brève (moins de 20 mois). Cependant, nous observons que les persistances les plus longues ont lieu de septembre à mars. Il apparaît aussi que les séries continues de journées où l'on observe des inversions sont aussi les plus longues pendant cette période. Ceci n'a rien d'étonnant puisque l'énergie calorifique apportée par le soleil est nettement moindre en cette période.

4. *Persistance et valeur des inversions*

La figure 4 montre qu'il existe une relation entre la valeur des inversions et la persistance. Il s'agit de courbes cumulatives de pourcentage où sont représentés, pour quatre classes de persistances, les divers pourcentages des écarts de température entre 25 et 100 m d'une part, le sol d'autre part. Par exemple, la courbe en trait gras continu (8) est relative aux persistances de 8 heures et plus et indique les pourcentages cumulés des écarts de température entre 100 m et le sol : 40% des écarts ont 2°C et moins ; 60% ont 3°C et moins, . . .

Déjà pour les écarts de température entre 25 m et le sol, on constate que plus longue est la persistance, plus les écarts sont élevés : 50% des persistances de plus de 8 heures ont des écarts supérieurs à 1°C tandis que

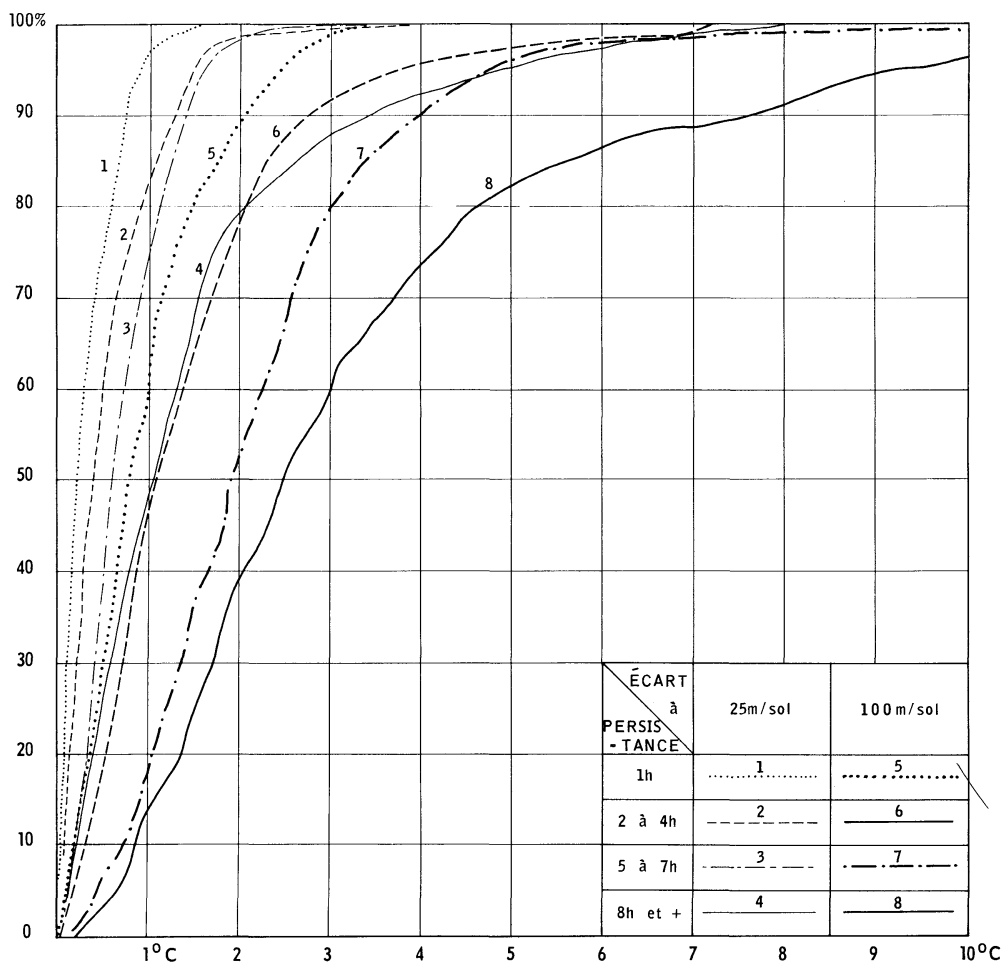


Figure 4 Relation persistance — valeur des inversions à 25 et 100 m

50% des persistances de 1 heure ne dépassent pas 0,2°C. Il y a 97% des persistances de 1 heure qui n'atteignent pas 1° d'écart. On constate même que 6% des persistances de plus de 8 heures dépassent 4,5°C, alors que cette température n'est jamais atteinte pour des persistances inférieures.

Cette constatation se vérifie encore mieux pour les écarts de 100 m par rapport au sol ; alors que, dans aucun cas des persistances de plus de 8 heures, les écarts de températures ne sont inférieurs à 0,25°C, on en compte déjà 15% des cas dans les persistances de 1 heure. Sauf pour les valeurs extrêmes, à pourcentage égal, la température est plus élevée de 1° environ pour la courbe 7 que pour la courbe 6. D'une façon peut-être encore plus frappante, on peut dire que le pourcentage des cas où la température est plus élevée qu'une valeur t ($\equiv 100\%$ moins le pourcentage relatif à t) est environ deux fois plus élevé pour la courbe 7 que pour la courbe 6 : 82% contre 43 pour 1°C ; 48 et 22% pour 2°C ; 20 et 9% pour 3°C ; 4,5 et 2% pour 5°C.

Egalement, on peut vérifier que, sauf toujours pour les valeurs extrêmes, le pourcentage de cas où la température est plus élevée qu'une valeur t est une fonction logarithmique du premier degré. On peut voir alors que lorsque $\Delta T_{100\text{ m} - 1,7\text{ m}}$ croît de 1°C , la fréquence ainsi exprimée est divisée par 1,46 pour les persistance de plus de 8 heures, quand les fréquences des autres courbes sont divisées par 2,3 et 2,5. Autrement dit, lorsqu'on passe de T à $T+1$, le nombre de cas où la température est supérieure à T ou $T+1$ décroît environ 1,5 fois moins vite pour les persistance de plus de 8 heures que pour les autres persistance.

Les principales conséquences qu'il faut tirer de ces observations sont les suivantes : on peut non seulement dire que plus la persistance est élevée, les grands sont les écarts. Il faut aussi ajouter cet aspect plus important encore : une persistance élevée n'aura pas d'écart faible. En d'autres termes, cela signifie qu'une inversion à persistance élevée sera *dès le départ* une inversion à grands écarts de température entre 100 m et le sol et réciproquement. Cette caractéristique comporte une valeur pronostique non négligeable.

5. Les isothermies de 75 et 100 m

Nous avons attiré l'attention déjà sur le pourcentage élevé que représentent par rapport au total de la période courue les isothermies à 75 et 100 m (c'est-à-dire les cas où l'écart entre 100 et 75 m est nul et où, en même temps, la température à 100 m est inférieure à la température au sol). L'ensemble des isothermies à 75 et 100 m couvre 45,1% du temps qui se répartissent en 10,0 et 35,1% suivant que l'équilibre thermique moyen est neutre ou instable, la limite choisie entre conditions instables et neutres étant de $T = -0,8^\circ\text{C}$ à 100 m.

a) Isothermie de 75 et 100 m avec $0,8^\circ\text{C} \leq \Delta t_{100\text{ m}} < 0^\circ\text{C}$

Nous n'avons fait qu'aborder deux aspects dans cette étude : la coupe verticale des températures et la persistance. Sur la figure 5, nous avons représenté, outre le gradient correspondant aux modes, les zones couvertes par la coupe verticale des températures dans 20, 50 et 80% des cas.

Cette figure montre une nette tendance à l'isothermie entre 25 et 100 m. Mais on constate que cet état de chose, favorable à la pollution, est corrigé par le gradient de 0 à 25 m. Dans 92% des cas, en effet, ce dernier indique un équilibre thermique instable ou très instable. Il serait évidemment précieux de connaître l'étagement des températures à une altitude supérieure à 100m. Il est fort vraisemblable, en effet, que le gradient redevienne adiabatique au-delà de 100 m. Nous en avons des indices : la différence de température 75 m - 50 m est positive dans 21 cas sur 100 ; et dans 14 de ces 21 cas, l'écart de température 50m - 25m est également positif ou nul. Ceci signifie que l'isothermie à 75 et 100 m représente une amorce de retour vers un gradient adiabatique au-delà de 100 m de hauteur.

En supposant que l'ensemble des cas envisagés sous le paragraphe 5a) possède le gradient supposé ci-dessus, nous aurions ainsi 10% du temps où un équilibre neutre ou stable serait compris entre deux couches à équilibre thermique instable. Un effluent gazeux, déversé dans la couche médiane, serait alors soumis au phénomène de *leaking* et non de *fanning* ou fumigation.

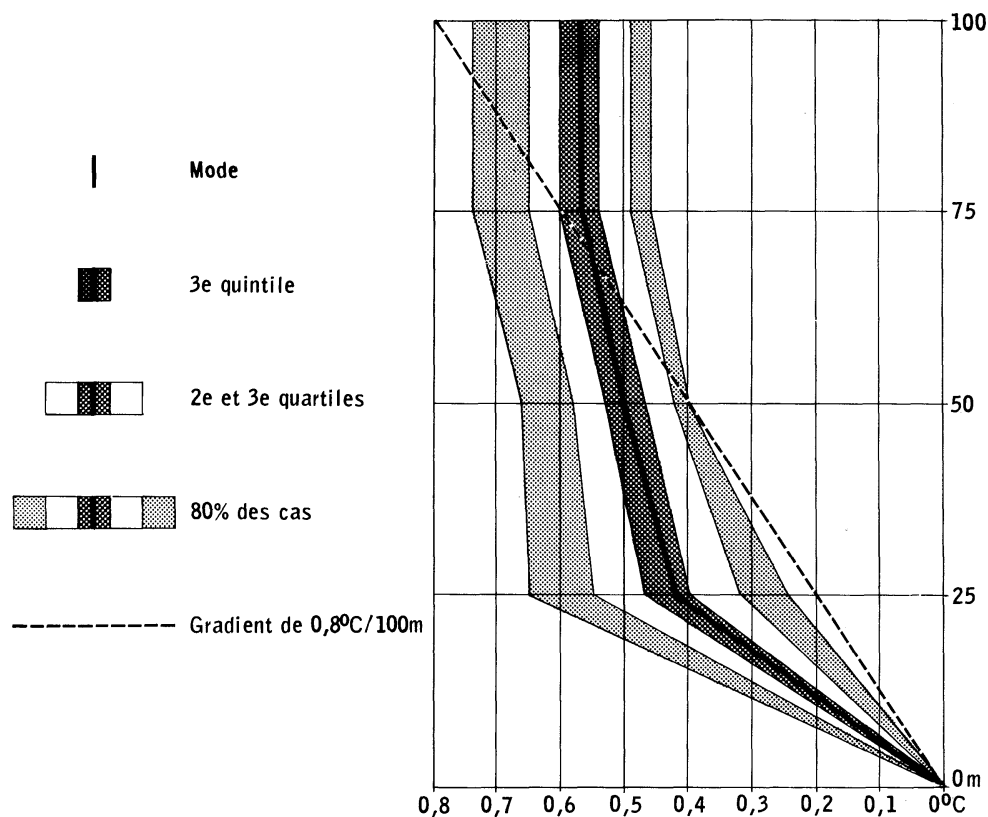


Figure 5 Isothermies de 75 et 100 m avec $-0,8^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{100\text{m}} - 1,7\text{m} < 0,0^{\circ}\text{C}$

La persistance observée pour ces situations est celle qui figure dans le tableau 3 ci-dessous :

Tableau 3 Isothermies de 75 et 100 m avec $-0,8^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{100\text{m}} < 0^{\circ}\text{C}$: pourcentages cumulatifs des persistances.

Persistances (heures)	1	2	3	4	5	6	7	8	...	12
Pourcentages cumulatifs correspondants	100	42	21	12	8	4,7	4,2	3,7	...	0,4

(Exemples de lecture : 42% des situations durent 2 heures et plus ; 8% durent 5 heures et plus).

b) Isothermies des niveaux 75 et 100 m avec température 100 m – sol $< -0,8^{\circ}\text{C}$.

Cette catégorie de coupes verticales de l'atmosphère ne représente évidemment guère de conditions favorables à une pollution élevée au sol. Nous avons tenu cependant à la distinguer des conditions d'équilibre thermique instable pour deux raisons : tout d'abord elle possède une fréquence d'occurrence très élevée, puisqu'elle représente 35% du temps ; ensuite, parce que le comportement d'un effluent dépend du gradient de température et non de la simple différence qui existe entre le niveau du sol et celui du rejet des effluents.

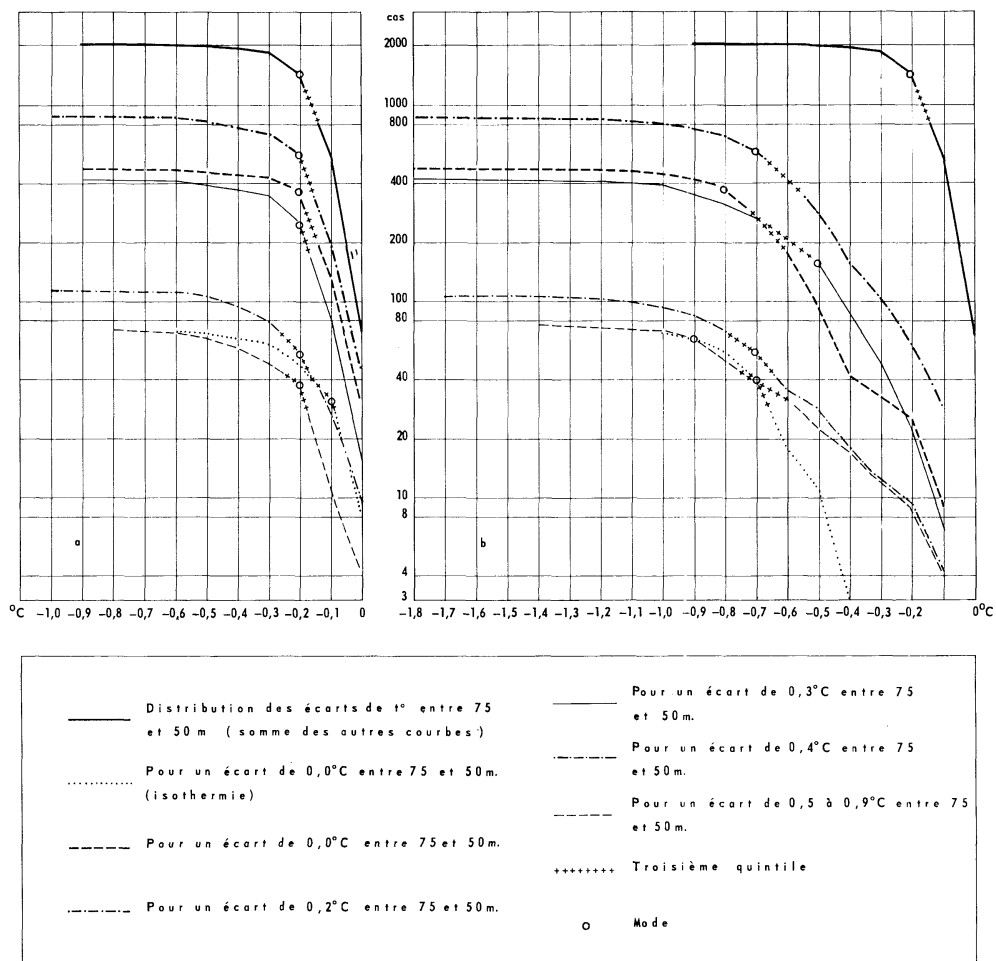


Figure 6 Isothermies de 75 et 100m avec $\Delta T_{100m - 1,7m} < -0.8^\circ\text{C}$

Sur la figure 6, nous avons représenté les courbes cumulatives indiquant (figure 6a) les écarts de température entre 50 et 25 m et (figure 6b) entre 25 m et le sol. Chaque courbe reprend, pour l'écart considéré, chacune des classes d'écarts de 75 m à 50 m par $1/10$ de degré (courbe supérieure). Il est ainsi possible de constituer tous les gradients de l'échantillon choisi (2035 cas). Si l'on s'en tient aux modes ou aux troisièmes quintiles, on constate que les gradients indiquent, dans la majorité des cas envisagés ici, un équilibre thermique très instable jusque 50 m, puis instable à neutre entre 50 et 75 m, enfin neutre de 75 m à 100 m. On pourra observer que, dans la grande majorité des cas, le type de comportement d'un effluent serait donc le *looping*, avec quelques cas de fumigation. Nous pensons que ce type de gradient est associé à un vent fort ou moyen. L'étude d'un grand nombre de cas permettra prochainement de le confirmer ou de l'infirmier.

6. Localisation des inversions

Les inversions sont notamment caractérisables par la hauteur respective de leur base et de leur sommet. Il est intéressant de connaître ces deux caractéristiques, car on peut concevoir des aménagements techniques simples⁵ qui permettraient aux effluents de franchir les inversions et ainsi de limiter l'intensité de la pollution.

La connaissance de la hauteur du sommet des inversions n'est possible évidemment que dans la mesure où cette hauteur est inférieure à 100 m. C'est relativement peu par rapport à d'autres mâts météorologiques⁶ et par rapport à la « hauteur effective » des cheminées, laquelle comprend la hauteur géométrique (HG) et la hauteur de l'ascension verticale des effluents au-dessus du sommet de la cheminée (ΔH).

Au sujet des inversions (figure 7 c) où s'observent des écarts positifs de température aux quatre niveaux (de 25, 50, 75 et 100m), nous savons que la base est située au sol. La hauteur du sommet nous est inconnue mais, en général, elle doit être assez élevée. Nous avons vu, en effet, que les inversions aux quatre niveaux sont aussi les plus fortes, si l'on entend par là que ce sont elles qui ont les écarts les plus grands entre deux niveaux successifs.

Les inversions à trois niveaux sont presque toutes localisées aux trois niveaux supérieurs (type figure 7 g). Pour moins de 6% des inversions à trois niveaux (= 1,2% du total des inversions = 0,23% du temps), on en connaît à la fois la base et le sommet (figure 7 d, e, f).

Nous apprenons toutefois une chose utile : dans 21% des cas, la base est située entre 25 et 50 m. La persistance de telles situations n'est toutefois pas énorme : 15% durent 3 heures et plus.

Pour les inversions à deux niveaux, ce sont encore les niveaux supérieurs qui sont surtout concernés : dans 92% des cas, c'est à 75 et 100 m que se trouvent les écarts positifs. Cela revient à dire que dans 1,8% du temps total, la base des inversions est située sous 75 m.

Les inversions à un seul niveau, enfin, se répartissent à raison de 52,8% à 100 m (figure 7 m) et 45% à 25 m (figure 7 n), ce qui représente respectivement 2% et 1,7% du total des heures courues.

On voit qu'en fait on ne connaît les sommets des inversions que dans un très faible pourcentage du total des heures courues : un peu moins de 2%. On peut en conclure que les enregistrements de la Tour du Bol d'Air ne permettent pas de préconiser, comme moyen de lutte contre la pollution, un dispositif permettant aux fumées d'usines de franchir les inversions, d'autant plus que celles-ci, pour la plupart, sont suffisamment basses pour être franchies sans aménagement spécial.

⁵ Par exemple par accroissement de l'énergie cinétique et de l'énergie thermique des effluents.

⁶ Celui de Tihange a 200 m.

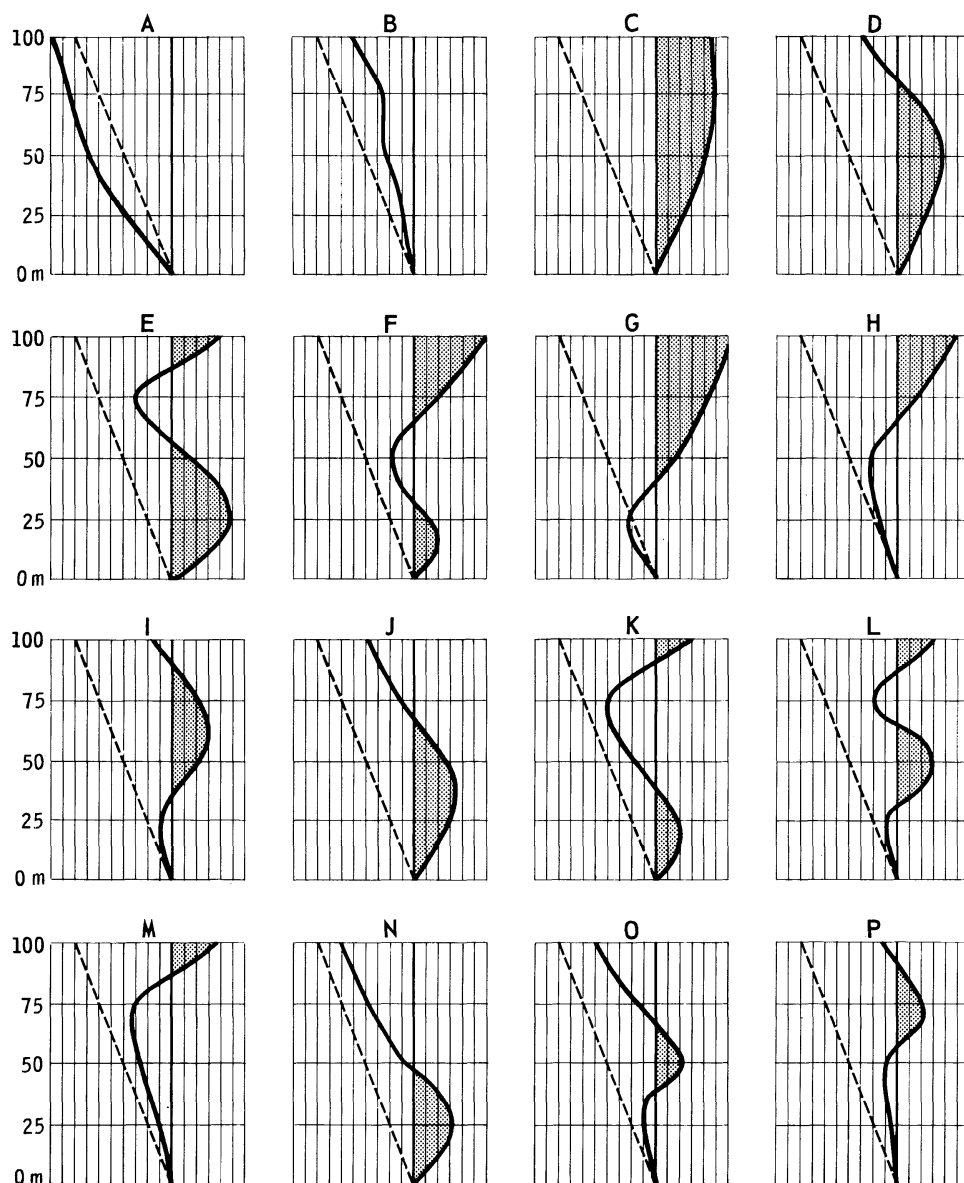


Figure 7 Localisation des inversions : les types de gradients possibles

7. La stabilité de l'air.

L'étude des persistances fait ressortir un point suffisamment frappant pour qu'il mérite d'être souligné. Dans les cas d'inversion, la superposition de couches d'air à températures différentes a un caractère tellement accusé que l'on peut réellement parler d'écoulement laminaire.

Donnons-en quelques exemples : 3% des inversions localisées aux trois niveaux supérieurs durent plus de 6 heures. Mieux: dans un cas, nous avons observé à 50 m une température de 4,5°C plus chaude qu'au sol, alors que le gradient de la couche comprise entre le sol et 25m était adiabatique. Pour des écarts positifs situés à 25 m, on en dénombre encore près de 4% dont la persistance est supérieure à 6 heures.

Tous ces chiffres montrent bien à quel point, dans les cas d'inversion, les échanges verticaux de température sont faibles ou lents.

8. Modes d'installation ou de résorption des inversions.

La connaissance des températures vraies de la sonde de référence (qui, rappelons-le, est située à 1,7 m du sol) devait, semblait-il, nous permettre d'étudier de quelle façon s'installe ou se résorbe une inversion. Il est en effet intéressant de savoir si c'est toujours par refroidissement des couches voisines du sol, ou bien par apport d'air chaud en altitude que se créent les inversions. De même, nous espérons voir dans quelle mesure les inversions étaient levées par arrivée d'air froid en altitude ou par réchauffement progressif de la base.

Malheureusement, le dépouillement des enregistrements n'a abouti à aucun résultat, sans doute parce que nous cherchions à retrouver les quatre schémas exposés ci-dessus. Il semble, en effet, que le processus ne soit pas aussi simple qu'on l'imagine souvent. Si les inversions s'installaient par refroidissement progressif du sol, les premiers niveaux à apparaître en inversion seraient les inférieurs, puis successivement les autres niveaux jusqu'à 100 m. Or, au contraire, lorsque deux ou trois niveaux seulement sont en inversion, dans plus de 90% des cas, nous l'avons vu, ce sont les niveaux supérieurs qui accusent un écart positif par rapport au sol, tandis que les niveaux de 25 ou 50 m ont encore un équilibre thermique instable ou neutre. Ces situations jouissent même de persistances non négligeables.

Second fait : nous avons examiné la distribution circadienne des inversions sur la figure 2 et celle-ci était établie en fonction de classes d'écarts de température 100 m — sol ; or, si les écarts 100 m — sol s'installaient progressivement, les courbes des écarts plus faibles (C, puis B, puis A) auraient successivement des fréquences plus importantes au début de la journée. Il n'en est rien.

Enfin, troisième fait : nous avons remarqué plus haut (figure 4) que lorsqu'une inversion à persistance élevée s'installait elle débutait directement par de grands écarts de température, notamment entre 100 m et le sol. Ceci montre également que l'évolution des températures pour un niveau considéré est brutale.

A la lumière de ces constatations, il semble qu'on puisse induire les principes suivants : lorsqu'une inversion s'installe, ce sont d'abord les niveaux supérieurs qui accusent des écarts positifs ; lorsqu'un niveau devient plus chaud relativement au sol, il atteint *rapidement* une valeur d'écart qui évoluera lentement ; par contre, la transmission d'écarts positifs d'un niveau quelconque au niveau inférieur peut être très lente.

En conséquence, le schéma général d'installation d'inversion peut être caractérisé par les traits suivants : tandis que les niveaux inférieurs restent neutres ou adiabatiques, les niveaux supérieurs (100 m ou 100 et 75 m) acquièrent rapidement des écarts positifs par rapport au sol. Lorsque la température décroît au sol, elle décroît également à ces niveaux supérieurs, de telle sorte que les écarts varient peu. La stabilité thermique des couches d'air est telle que les niveaux inférieurs peuvent attendre plusieurs heures avant de passer eux aussi à des écarts positifs. Ils le font alors rapidement. Simultanément, les écarts par rapport au sol de chacun des niveaux s'accroissent alors lentement.

*
* * *

La présente étude des inversions apporte des résultats nettement positifs.

Elle dresse tout d'abord un inventaire des conditions d'équilibre thermique entre 0 et 100 m sur le plateau du Sart Tilman. Sur 24 heures, 7 en moyenne seulement auraient un gradient très instable contre 5 1/4 pour un équilibre stable, les heures restantes étant caractérisées par un gradient neutre à un niveau quelconque.

Pour moins de la moitié des inversions, la différence de température 100 m — sol est plus élevée que 1°C. Mais cette différence peut atteindre des valeurs très élevées : peut-être 16°C à 100 m. Les inversions faibles atteignent un minimum de fréquence dès 10 ou 11 heures du matin. Au total, cependant, c'est seulement vers 16 heures que la fréquence est la plus faible.

Nous avons vu également qu'en cas d'inversion le nombre de niveaux où se présente un écart positif par rapport au sol fluctue et que la fréquence des inversions diminue plus rapidement au-delà d'un seuil de persistance égal à 11 heures.

Les inversions les plus fortes sont aussi celles qui durent le plus longtemps et, fait remarquable, il est possible de prévoir, dans une certaine mesure, ces inversions fortes et longues. Elles accusent, en effet, dès le départ, des écarts de température élevés, entre 100 m et le sol.

Un aspect non moins remarquable de cette étude réside dans la fréquence des cas où se présente une isothermie des niveaux 75 et 100 m, tandis que les niveaux inférieurs jouissent d'un équilibre thermique neutre ou instable, voire très instable.

Si l'on envisage la hauteur des niveaux où se présentent des écarts positifs par rapport au sol, on constate de façon très nette que ce sont préférentiellement les niveaux les plus élevés qui sont concernés. De telles situations ne sont d'ailleurs pas transitoires puisqu'elles possèdent des persistance non négligables. Ceci montre bien la grande stabilité de l'air et aussi, à l'échelle de travail, son écoulement laminaire, car des couches d'air à températures différentes peuvent se superposer pendant plusieurs heures sans qu'il se mélange.

Enfin, l'ensemble des résultats de cette étude permet de se faire une idée du processus d'installation des inversions. Celui-ci serait, au Sart Tilman, tout différent des schémas proposés classiquement et suivant lesquels installation et résorption des inversions se manifestent d'abord par un refroidissement et un réchauffement des couches les plus basses.

Il est bien entendu que nous ne prétendons pas étendre nos conclusions à d'autres sites, notamment aux sites de plaines et aux sites de vallées. Nous les tirons uniquement de la station du Bol d'Air c'est-à-dire à une situation de bord de plateau, à proximité de la Meuse. Des précisions utiles et des acquisitions entièrement nouvelles seraient certainement obtenues en utilisant un mât plus élevé ou en comparant nos résultats avec les gradients observés dans les vallées. Mais, cela, c'est un autre travail.

RÉSUMÉ

L'auteur présente une étude des inversions thermiques dans les basses couches de l'atmosphère. Ces inversions ont été mesurées sur un mât de 100 mètres pendant 20 mois environ. Elles ne dépassent pas, pour plus de la moitié d'entre elles, un gradient de $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ mais peuvent occasionnellement dépasser largement 10°C . Les inversions dont la base est au sol sont celles qui durent le plus longtemps ; de même, leur persistance croît avec leur puissance et ceci comporte un aspect pronostique intéressant. Le problème de la hauteur et de la base des inversions est également envisagé ; il débouche directement sur leur mode d'installation et de résorption. Ces deux derniers aspects diffèrent nettement, pour le site considéré, des schémas proposés classiquement.

ABSTRACT

The author presents a study of the temperature inversion in the low layers of the atmosphere. The temperature was measured on a 100-metre tower over a period of some 20 months. In the case of more than 50 per cent of the inversions, the gradient did not exceed $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, but on occasion surpassed 10°C . The surface-based inversions were the most persistent ; moreover this persistence increased directly with their intensity, which suggests an interesting prognostic aspect. The problem of the height and base of the inversion is also discussed ; it is related directly to their mode of creation and destruction. At this particular site, these last two aspects differ considerably from the classical concepts.